



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRICA**



**CORRELACIÓN ENTRE BIOMARCADORES DE VARIABILIDAD DE LA
FRECUENCIA CARDIACA OBTENIDOS DESDE PPG Y LOS ÍNDICES DE
ANSIEDAD/DEPRESIÓN EN POBLACIÓN PEDIÁTRICA**

POR

Alejandro González Vallejos

Informe Final Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de
Concepción para optar al grado académico de Ingeniero/a Civil Biomédica

Profesores Guía
Esteban Javier Pino Quiroa
Mabel Urrutia Martínez

Diciembre 2025
Concepción
(Chile)

© 2025 Alejandro González

© 2025 Alejandro González

Se autoriza la reproducción total o parcial de esta memoria por cualquier medio, siempre que se cite adecuadamente al autor y a la Universidad de Concepción, y que no se realice con fines comerciales.



Agradecimientos

A mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido la base que me ha permitido avanzar incluso en los momentos más difíciles. Gracias por su paciencia, su cariño y su fe constante en mí. Les dedico la culminación de este largo y significativo camino de aprendizaje y descubrimiento.



Resumen

El estudio tuvo como objetivo evaluar la relación entre biomarcadores de variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV), obtenidos a partir de señales fotopletimográficas (PPG), y los niveles de ansiedad y depresión en población pediátrica. Para ello, se procesaron registros PPG de 45 minutos por participante mediante un pipeline que incluyó filtrado pasabanda, detección de picos y un método robusto basado en el rango intercuartílico (IQR) para descartar intervalos no fisiológicos. Las señales fueron segmentadas en bloques consecutivos de cinco minutos y solo se retuvieron para el análisis aquellos participantes que presentaron entre cinco y ocho ventanas válidas, con al menos un 75% de intervalos NN coherentes en cada segmento.

A partir de cada ventana se calcularon métricas HRV en dominios temporal y frecuencial, incluyendo MeanNN, SDNN, RMSSD, LF, HF y el índice LF/HF. Estos biomarcadores se integraron con los puntajes de ansiedad y depresión obtenidos mediante cuestionarios psicométricos validados. Sobre esta base, se realizaron análisis descriptivos, correlaciones de Spearman con corrección por Falsa Tasa de Descubrimiento (FDR) y exploraciones visuales mediante gráficos de dispersión y diagramas de pares (*pairplots*).

Los resultados mostraron que los biomarcadores HRV derivados de las señales PPG presentaron valores y patrones de correlación interna coherentes con la fisiología autonómica descrita en menores, así como tendencias asociadas a la edad compatibles con la maduración autonómica. Sin embargo, las correlaciones entre HRV en reposo y los niveles de ansiedad y depresión fueron de baja magnitud ($|\rho| \leq 0,21$) y ninguna asociación alcanzó significancia estadística tras la corrección por FDR. Los análisis visuales evidenciaron una alta variabilidad interindividual y una marcada superposición entre los grupos de probabilidad de ansiedad y depresión, lo que indica una capacidad discriminativa limitada de la HRV basal en esta población.

Se concluye que, aunque la HRV refleja aspectos relevantes del funcionamiento autonómico y puede obtenerse de manera fiable a partir de señales PPG mediante un pipeline reproducible, su uso como indicador aislado de estados emocionales en menores resulta limitado bajo condiciones de reposo. Se propone como línea futura la incorporación de protocolos dinámicos y la integración de la HRV con otros marcadores fisiológicos y psicológicos, con el fin de mejorar la sensibilidad para detectar diferencias emocionales clínicamente significativas.

Abstract

The aim of this study was to evaluate the relationship between heart rate variability (HRV) biomarkers derived from photoplethysmography (PPG) and anxiety/depression levels in a pediatric population. Forty-five-minute PPG recordings were processed using a pipeline that included band-pass filtering, peak detection and a robust interquartile-range (IQR)-based method to remove non-physiological intervals. Signals were segmented into consecutive five-minute windows, and only participants with five to eight valid segments, each containing at least 75% stable NN intervals, were retained for analysis.

Time- and frequency-domain HRV metrics—including MeanNN, SDNN, RMSSD, LF, HF and the LF/HF ratio—were computed for each window and averaged per participant. These biomarkers were then matched with anxiety and depression scores obtained from validated psychometric questionnaires. Descriptive statistics, Spearman correlations with False Discovery Rate (FDR) correction and visual analyses using scatterplots and pairplots were conducted to explore the association between autonomic modulation and emotional states.

The results showed that HRV biomarkers derived from PPG exhibited physiologically coherent values and internal correlation patterns consistent with autonomic regulation in children and adolescents, as well as age-related trends compatible with autonomic maturation. However, correlations between resting HRV and anxiety/depression levels were small in magnitude ($|\rho| \leq 0.21$), and none remained statistically significant after FDR correction. Visual analyses revealed high interindividual variability and substantial overlap between emotional groups, indicating a limited discriminative capacity of resting HRV in this population.

Overall, the findings suggest that, although HRV captures relevant aspects of autonomic function and can be reliably extracted from PPG using a reproducible processing pipeline, it is insufficient as a standalone indicator of emotional states in children and adolescents under resting conditions. Future research should incorporate dynamic protocols and combine HRV with additional physiological and psychological measures to enhance sensitivity to clinically meaningful emotional differences.

Tabla de Contenidos

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1.1 <i>Objetivo General</i>	2
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	2
1.2. ALCANCES Y LIMITACIONES	3
1.3. METODOLOGÍA	3
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. SEÑALES FOTOPLETISMOGRÁFICAS (PPG)	4
2.2. SISTEMA NERVIOSO AUTÓNOMO Y REGULACIÓN FISIOLÓGICA	4
2.3. VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDÍACA	4
2.3.1 <i>HRV en el dominio temporal</i>	5
2.3.2 <i>HRV en el dominio frecuencial</i>	5
2.4. HRV Y SE RELACIÓN CON LA SALUD EMOCIONAL	6
2.5. PPG COMO HERRAMIENTA PARA LA ESTIMACIÓN DE HRV EN MENORES	6
2.6. DISCUSIÓN	7
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1. DISEÑO DEL ESTUDIO	8
3.2. DATOS Y PARTICIPANTES	8
3.3. SEÑALES PPG: OBTENCIÓN Y CARACTERÍSTICAS	8
3.4. PREPROCESAMIENTO DE LA SEÑAL	9
3.4.1 <i>Manejo de artefactos y detección robusta de ruido</i>	10
3.5. SEGMENTACIÓN DE LA SEÑAL	10
3.6. EXTRACCIÓN DE BIOMARCADORES HRV	11
3.6.1 <i>Métricas temporales</i>	11
3.6.2 <i>Métricas frecuenciales</i>	12
3.7. EMPAREJAMIENTO CON ÍNDICES PSICOLÓGICOS	12
3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	12
3.9. SOFTWARE Y REPRODUCIBILIDAD	13
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	14
4.1. INTRODUCCIÓN	14
4.2. CALIDAD DE LA SEÑAL Y ETAPA DE LIMPIEZA	14
4.3. SEGMENTACIÓN EN VENTANAS DE CINCO MINUTOS	18
4.4. BIOMARCADORES HRV DERIVADOS	18
4.5. CORRELACIONES ENTRE HRV Y LOS NIVELES DE ANSIEDAD Y DEPRESIÓN	19
4.6. ANÁLISIS VISUAL MULTIVARIADO	21
4.7. SÍNTESIS DE HALLAZGOS	23
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	24
5.1. DISCUSIÓN	24
5.2. CONCLUSIONES	27
5.3. TRABAJO FUTURO	28
CAPÍTULO 6. GLOSARIO	29
CAPÍTULO 7. REFERENCIAS	30

Lista de tablas

Tabla 4.1 Características demográficas y psicológicas de la muestra incluida en el análisis (5–8 bloques válidos).....	15
Tabla 4.2 Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk.	19
Tabla 4.3 Correlaciones de Spearman entre biomarcadores HRV y los índices de ansiedad y depresión, con corrección FDR (n = 62).	20
Tabla 5.1 Comparación de biomarcadores de variabilidad de la frecuencia cardiaca (HRV) entre el presente estudio y los valores reportados por Silvetti et al. (2001).....	24



Lista de Figuras

Figura 1.1 Diagrama de flujo del proceso	3
Figura 3.1 Ejemplo de señal de paciente	9
Figura 4.1 Señal PPG original y filtrada con los segmentos válidos destacados en verde.	14
Figura 4.2 Histograma de edades de los pacientes filtrados	16
Figura 4.3 Histograma de la señal con acercamiento.	17
Figura 4.4 Matriz de correlación de Spearman entre los biomarcadores de HRV	19
Figura 4.5 Diagrama de pares (pairplot) de los biomarcadores según las categorías de ansiedad.....	21
Figura 4.6 Diagrama de pares (pairplot) de los biomarcadores según las categorías de depresión. ..	22



Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

Los trastornos emocionales en niños y adolescentes representan un desafío creciente para la salud pública a nivel mundial (UNICEF, 2021). Se estima que 1 de cada 7 jóvenes entre 10 y 19 años presenta un trastorno mental, siendo la ansiedad y la depresión los diagnósticos más frecuentes. La Organización Mundial de la Salud reporta (World Health Organization, 2022) que los trastornos depresivos y ansiosos se encuentran entre las principales causas de morbilidad en este grupo etario, produciendo limitaciones significativas en el funcionamiento cognitivo y social. Adicionalmente, un metaanálisis evidenció que la prevalencia global de ansiedad y depresión en menores aumentó en aproximadamente 25% (Racine et al., 2021) durante el periodo pandémico.

A pesar de la disponibilidad de instrumentos psicométricos validados, la evaluación emocional en población pediátrica se enfrenta a limitaciones importantes, entre ellas la variabilidad en el autorreporte, las diferencias en el desarrollo cognitivo y la dificultad para identificar síntomas de manera consistente. Este escenario ha impulsado la búsqueda de biomarcadores fisiológicos objetivos que permitan complementar la información entregada por cuestionarios tradicionales. Uno de los indicadores más investigados en este contexto es la Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV), la cual refleja la modulación autonómica entre las ramas simpática y parasimpática del sistema nervioso.

La HRV ha mostrado asociaciones relevantes con la regulación emocional, la flexibilidad fisiológica y el riesgo psicopatológico en adultos. Sin embargo, en población pediátrica la evidencia es más heterogénea, en parte debido a la alta variabilidad interindividual, al proceso de maduración autonómica y a la influencia de factores externos como la respiración o el estado atencional. Estas características hacen necesario investigar con mayor precisión si la HRV puede funcionar como un indicador complementario de estados emocionales en menores. (Chalmers et al., 2014; Malik et al., 1996; Shaffer & Ginsberg, 2017; Thayer et al., 2012)

En este contexto, la fotopletismografía (PPG) emerge como una herramienta ideal para estudios pediátricos, ya que permite obtener señales pulsátiles de forma no invasiva y con alta tolerancia por parte del paciente. La PPG se ha consolidado como una alternativa válida al electrocardiograma para la estimación de HRV, mostrando una concordancia robusta con métricas temporales y espectrales del intervalo NN en estudios metodológicos. (Elgendi, 2012; Schäfer & Vagedes, 2013)

Considerando estos antecedentes, surge la necesidad de evaluar si los biomarcadores HRV derivados de señales PPG son capaces de reflejar diferencias en los niveles de ansiedad y depresión en menores. Esto conduce al siguiente problema de investigación de si existe una relación entre los biomarcadores HRV obtenidos desde señales PPG y los niveles de ansiedad y depresión en población pediátrica.

A partir de la literatura, se plantea como hipótesis general que una menor actividad parasimpática reflejada en valores reducidos de HF, RMSSD y MeanNN se asociará con mayores niveles de ansiedad y depresión en menores. (Chalmers et al., 2014; Koenig et al., 2016; Wang et al., 2025)

No obstante, debido a la variabilidad fisiológica propia de esta etapa del desarrollo, es posible que la HRV basal presente limitada sensibilidad para detectar diferencias emocionales sin la aplicación de estímulos o protocolos de reactividad.

En conjunto, estos antecedentes fundamentan la pertinencia de estudiar de manera rigurosa la relación entre HRV extraída mediante PPG y los estados emocionales en población pediátrica, explorando tanto correlaciones lineales como modelos multivariados que permitan detectar patrones sutiles dentro de la señal fisiológica.



1.1.1 Objetivo General

Evaluar la relación entre los biomarcadores HRV derivados de señales PPG y los niveles de ansiedad y depresión en menores utilizando un pipeline reproducible de procesamiento de señales y análisis estadístico.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Procesar señales de PPG de 45 minutos por paciente mediante filtrado, detección de picos y segmentación en ventanas de 5 minutos.
- Extraer biomarcadores HRV en dominios temporal y no lineal (MeanNN, RMSSD, SDNN, LF, HF, LF/HF)
- Integrar los biomarcadores HRV con índices de ansiedad y depresión provenientes de instrumentos psicológicos aplicados a la población estudiada
- Analizar la relación entre HRV y estados emocionales mediante correlaciones, regresión múltiple penalizada y análisis exploratorio.

1.2. Alcances y Limitaciones

- i. El estudio se centra exclusivamente en HRV en reposo.
- ii. Se utiliza señal PPG como fuente de datos cardiovasculares.
- iii. La población corresponde a menores de edad de la región del Biobío.
- iv. Se desarrolló un pipeline reproducible que puede ser aplicado a futuros estudios.
- v. La muestra presenta una distribución etaria binomial (mayoría de 12 y 15-16 años).
- vi. Alta variabilidad interindividual en HRV pediátrica

1.3. Metodología

Para el desarrollo de esta memoria de título se empleó un enfoque metodológico cuantitativo basado en el análisis de señales fisiológicas y su integración con indicadores psicológicos. El estudio considera la utilización de señales PPG de 45 minutos por participante, desde las cuales se extrajeron biomarcadores de HRV mediante procedimientos estandarizados de preprocesamiento, segmentación y análisis espectral.

La finalidad de esta metodología es evaluar, de manera objetiva y reproducible, si los biomarcadores HRV pueden asociarse con los puntajes de ansiedad y depresión obtenidos mediante instrumentos psicométricos aplicados a población pediátrica. Para ello, se implementó un pipeline estructurado que incluye filtrado de la señal, detección de picos, generación de ventanas de cinco minutos, cálculo de métricas HRV en dominios temporales, frecuenciales y no lineales, e integración con las variables psicológicas.

Posteriormente, los datos fueron analizados mediante estadística descriptiva, correlaciones lineales y no paramétricas, exploración visual mediante gráficos de dispersión y pairplots. Este enfoque combinó técnicas tradicionales con métodos multivariados modernos, permitiendo una evaluación detallada de los patrones autonómicos presentes en la muestra.

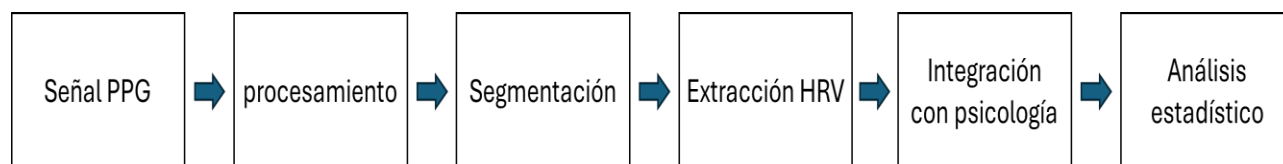


Figura 1.1 Diagrama de flujo del proceso

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Señales fotopletimográficas (PPG)

La PPG es una técnica óptica no invasiva ampliamente utilizada para medir cambios en el volumen sanguíneo periférico. Su funcionamiento se basa en un emisor de luz y un fotodetector que registran variaciones en la absorción o reflexión luminosa causadas por el pulso cardíaco. La señal resultante contiene componentes pulsátiles asociados al ciclo cardíaco y componentes de baja frecuencia ligados a procesos respiratorios y vasomotores. Debido a su facilidad de uso, bajo costo y aceptabilidad en población pediátrica, la PPG se ha convertido en una alternativa viable al electrocardiograma (ECG) para estudios de frecuencia y variabilidad cardíacas.(Elgendi, 2012)

2.2. Sistema nervioso Autónomo y regulación fisiológica

El sistema nervioso autónomo (SNA) es responsable de regular funciones fisiológicas involuntarias, entre ellas la frecuencia cardíaca, el tono vascular y la actividad respiratoria. Se compone de dos ramas principales: el sistema simpático, que favorece respuestas de activación y alerta, y el sistema parasimpático, que promueve estados de reposo y recuperación. La interacción dinámica entre ambas ramas determina el comportamiento rítmico del corazón.

El análisis de la HRV permite inferir el equilibrio entre estas dos ramas. Una mayor modulación parasimpática suele manifestarse como mayor variabilidad en los intervalos entre latidos, mientras que niveles elevados de activación simpática tienden a reducir dicha variación. Por ello, la HRV se considera un indicador relevante del estado autonómico y, de manera indirecta, del estado emocional y la capacidad de regulación fisiológica.(Malik et al., 1996; Shaffer & Ginsberg, 2017)

2.3. Variabilidad de la frecuencia cardíaca

La HRV corresponde a las fluctuaciones que se observan entre latidos consecutivos (intervalos NN). Estas fluctuaciones reflejan la capacidad del organismo para adaptarse a demandas internas y externas, y proporcionan información sobre la regulación autonómica. Una HRV elevada

generalmente se asocia con un mayor predominio parasimpático y una mayor flexibilidad fisiológica; por el contrario, niveles reducidos pueden indicar estrés, fatiga o alteraciones emocionales.

Existen múltiples métodos para cuantificar la HRV. En este estudio se utilizaron únicamente métricas de los dominios temporal y frecuencial, dado que son las más validadas en población pediátrica y presentan buena estabilidad cuando se derivan desde señales PPG.

2.3.1 HRV en el dominio temporal

El dominio temporal incluye indicadores que se calculan directamente a partir de los intervalos NN. Entre los principales se encuentran:

- RMSSD: que representa la raíz cuadrática media de las diferencias sucesivas entre intervalos NN y constituye uno de los marcadores más robustos de actividad parasimpática.
- SDNN: que corresponde a la desviación estándar de los intervalos NN y refleja la variabilidad total de la señal en un periodo determinado.
- MeanNN: que es el intervalo promedio entre latidos y se relaciona inversamente con la frecuencia cardíaca.

Estas métricas permiten obtener una visión global de la modulación autonómica en reposo. (Malik et al., 1996; Shaffer & Ginsberg, 2017)

2.3.2 HRV en el dominio frecuencial

El análisis espectral permite descomponer la señal en bandas de frecuencia fisiológicamente relevantes. Para este estudio se consideraron dos componentes principales:

- LF (Low Frequency, 0.04-0.15 Hz): Influido por la interacción simpático-parasimpática y mecanismos barorreflejos.
- HF (High Frequency, 0.15–0.40 Hz): Relacionado con la respiración y considerado un marcador directo de la actividad parasimpática.

A partir de estas bandas se calcula el índice LF/HF, empleado como aproximación del balance simpático-parasimpático, aunque su interpretación debe realizarse con cautela dependiendo de la población y el contexto de medición. (Malik et al., 1996)

2.4. HRV y se relación con la salud emocional

La HRV ha sido ampliamente estudiada en el contexto de la regulación emocional y los trastornos afectivos. Metaanálisis en adultos demuestran que la ansiedad y la depresión se asocian consistentemente con una reducción del tono vagal, evidenciada en menores valores de RMSSD y HF, junto con aumentos en la relación LF/HF. Estos hallazgos apoyan la hipótesis de que una menor flexibilidad autonómica puede estar vinculada con dificultades en la regulación emocional.(Chalmers et al., 2014; Koenig et al., 2016; Wang et al., 2025)

En población pediátrica, la evidencia es más heterogénea debido a la alta variabilidad interindividual, los procesos de maduración autonómica y diferencias en el estado psicofisiológico durante la medición. No obstante, diversos estudios coinciden en que la HRV constituye un indicador potencialmente útil para evaluar el funcionamiento autonómico en menores, especialmente cuando se utilizan protocolos prolongados y procedimientos estandarizados.(Ding et al., 2024; Sharma et al., 2011; Silvetti et al., 2001)



2.5. PPG como herramienta para la estimación de HRV en menores

La PPG representa una alternativa efectiva al ECG, especialmente en entornos donde se requiere comodidad del participante o disponibilidad de equipos portátiles. Su precisión para estimar RMSSD, SDNN, HF y LF ha sido demostrada en múltiples estudios comparativos, lo que respalda su uso en investigaciones clínicas y en entornos pediátricos donde la tolerancia al equipamiento es crítica.(Elgendi, 2012; Schäfer & Vagedes, 2013)

Además, la PPG permite realizar mediciones prolongadas sin generar incomodidad, lo cual favorece la obtención de segmentos estables de señal al trabajar con menores y, por ende, la calidad de los biomarcadores HRV derivados.

2.6. Discusión

Con la información recopilada en la revisión bibliográfica es posible establecer que la HRV constituye un indicador fisiológico relevante para comprender la modulación autonómica y su relación con los estados emocionales en población pediátrica. La evidencia revisada muestra que, tanto en adultos como en adolescentes, los indicadores parasimpáticos como RMSSD y HF tienden a disminuir en presencia de síntomas ansiosos o depresivos, mientras que el índice LF/HF suele aumentar en condiciones de mayor activación simpática. Aunque la magnitud de estos efectos es más heterogénea en menores, los estudios coinciden en que el sistema autónomo desempeña un rol fundamental en la regulación emocional durante el desarrollo.

Este panorama justifica la pertinencia de utilizar HRV como un biomarcador complementario a los instrumentos psicométricos tradicionales, especialmente considerando las limitaciones inherentes al autorreporte en población pediátrica. La literatura también destaca la ventaja de la PPG como método no invasivo y de alta tolerancia para obtener señales cardiovasculares prolongadas, lo cual resulta particularmente adecuado en estudios con niños y adolescentes.

A partir de estos antecedentes, se postula que el uso de señales PPG para la extracción de biomarcadores HRV constituye una solución adecuada para abordar el problema planteado. La combinación de un método accesible, tolerable y metodológicamente validado (PPG) con métricas HRV ampliamente estudiadas en regulación emocional proporciona un marco sólido para investigar la relación entre modulación autonómica y estados afectivos en menores. El enfoque propuesto es consistente con prácticas utilizadas en estudios recientes y ofrece la posibilidad de implementar análisis sistemáticos y reproducibles.

En consecuencia, el marco teórico respalda tanto la hipótesis inicial como la metodología seleccionada. Permite comprender por qué los biomarcadores HRV derivados de señales PPG son pertinentes para el estudio de ansiedad y depresión, y fundamenta el uso de herramientas estadísticas para evaluar la presencia de patrones fisiológicos que puedan estar asociados a estos estados emocionales.(Chalmers et al., 2014; Koenig et al., 2016; Malik et al., 1996)

Capítulo 3. Materiales y métodos

3.1. Diseño del estudio

El presente trabajo corresponde a un estudio cuantitativo, cuantitativo, observacional y de carácter transversal (González Mares, 2019; Manterola & Otzen, 2014). Su finalidad es evaluar la asociación entre biomarcadores de HRV, obtenidos mediante PPG, y los niveles de ansiedad y depresión medidos mediante instrumentos psicométricos en población pediátrica. El análisis se basa en señales fisiológicas de reposo y cuestionarios previamente aplicados.

3.2. Datos y participantes

El conjunto de datos utilizado corresponde a registros fisiológicos perteneciente a 97 pacientes de 45 minutos por participante y a un archivo independiente que contiene información demográfica (código de participante, género, edad) junto con los puntajes de ansiedad y depresión derivados de cuestionarios validados. Los registros PPG fueron obtenidos en un contexto controlado y en estado de reposo, asegurando condiciones adecuadas para el análisis de HRV basal.

Los criterios de inclusión considerados fueron:

- contar con señal PPG continua de 45 minutos,
- poseer al menos cinco segmentos válidos de 5 minutos para cálculo de HRV,
- disponer de datos psicológicos completos (ansiedad y depresión),
- integrar información demográfica básica.

Los participantes fueron anonimizados mediante un código numérico al momento del análisis.

El estudio se llevó a cabo en el marco del Proyecto de Exploración Fondecyt N.º 13220040 y fue aprobado por el Comité de Ética, Bioética y Bioseguridad de la Universidad de Concepción (CEBB 1386-2023).

3.3. Señales PPG: obtención y características

Las señales PPG fueron adquiridas con un sensor óptico de transmisión o reflexión, según disponibilidad del dispositivo utilizado. La frecuencia de muestreo empleada de 500 Hz permite identificar con precisión los picos sistólicos y reconstruir los intervalos entre pulsos, lo cual es fundamental para la extracción de HRV. La PPG resulta adecuada para población pediátrica debido a su carácter no invasivo, tolerable y fácil de colocar. (Elgendi, 2012)

La toma de la señal incluyó dos instancias de reposo de los pacientes de aproximadamente 5 minutos lo cual generó segmentos de ruido presente en las señales de los pacientes.

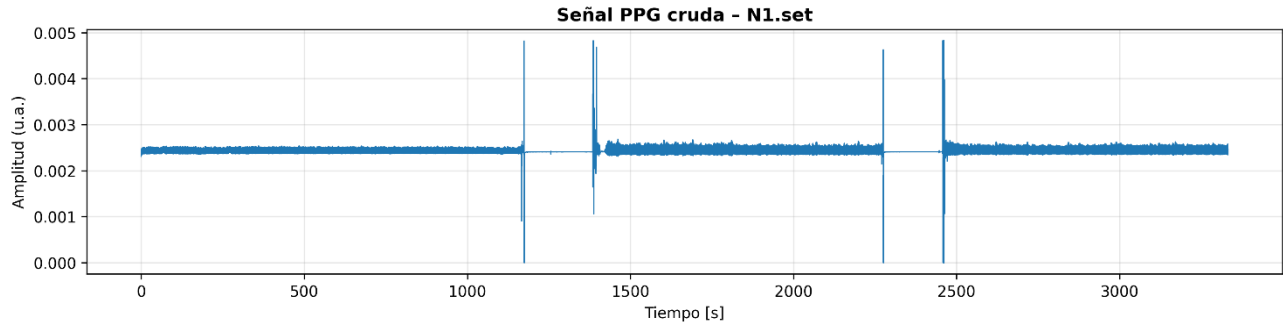


Figura 3.1 Ejemplo de señal de paciente

En la figura se presenta la señal de un paciente sin modificar donde se aprecian dos intervalos de ruido donde al paciente se le dio un descanso.

3.4. Preprocesamiento de la señal

El preprocesamiento tuvo como objetivo reducir ruido de alta frecuencia, artefactos por movimiento y variaciones espurias en la amplitud de la señal.

Se empleó un filtro pasa banda Butterworth, ampliamente utilizado en análisis biomédico debido a su respuesta suave y estabilidad. Su comportamiento frecuencial se define mediante:

$$|H(j\omega)|^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}$$

Donde ω_c corresponde a la frecuencia de corte y n es el orden del filtro.

El filtrado digital fue implementado mediante la convolución discreta entre la señal y la respuesta de impulso del filtro:

$$y[n] = \sum_{k=0}^M h[k]x[n-k]$$

Posteriormente, se aplicó detección de picos mediante los algoritmos disponibles en NeuroKit2, que consideran prominencia, distancia mínima entre pulsos, y umbrales adaptativos. También se incorporaron procedimientos automáticos de corrección de artefactos y validación visual para asegurar coherencia fisiológica en los intervalos NN obtenidos.

3.4.1 Manejo de artefactos y detección robusta de ruido

Durante el procesamiento de las señales PPG se observó que una proporción importante de los registros presentaba artefactos de alta amplitud y períodos de saturación del sensor. Para garantizar la validez fisiológica de los intervalos NN, se aplicó un método robusto de detección de valores atípicos basado en el rango intercuartílico (IQR).

A partir de los intervalos NN detectados, se definieron como válidos aquellos que cumplían:

$$Q_1 - 1.5(IQR) \leq NN_i \leq Q_3 + 1.5(IQR)$$

Donde Q_1 y Q_3 corresponden a los percentiles 25 y 75 de la distribución de intervalos, respectivamente. De este modo, solo se retiene el 75 % central de los valores, que representa el comportamiento fisiológicamente coherente del ritmo cardíaco, mientras que los intervalos situados muy por debajo de Q_1 o muy por encima de Q_3 se consideran atípicos y se descartan. Estos valores extremos suelen corresponder a intervalos inusualmente largos, asociados a ruido o pérdida de señal, o a intervalos anormalmente cortos, vinculados a errores de detección, por lo que su exclusión reduce de manera efectiva el impacto de los artefactos en el cálculo de HRV.

Para considerar una ventana de 5 minutos como válida, se exigió que al menos 75% de los intervalos NN pertenecieran al rango estable:

$$\frac{NN_{\text{válidos}}}{N_{\text{totales}}} \geq 0.75$$

Las ventanas que no cumplían este criterio fueron descartadas. Este proceso permitió construir un conjunto confiable de bloques fisiológicos a partir de señales inicialmente ruidosas y mejorar la calidad del cálculo de HRV.

3.5. Segmentación de la señal

Con el fin de obtener métricas HRV representativas y comparables, la señal PPG fue segmentada en ventanas consecutivas de cinco minutos sin solapamiento. Este tamaño de ventana se basa en la recomendación estándar para análisis de HRV en reposo. (Malik et al., 1996; Shaffer & Ginsberg, 2017)

Cada ventana fue tratada como estacionaria en primera aproximación:

$$x(t) \approx \text{estacionaria, para } t \in [0, 300 \text{ s}]$$

Se retuvieron únicamente participantes que presentaron entre 5 y 8 ventanas válidas, cumpliendo criterios de estabilidad y calidad de señal.

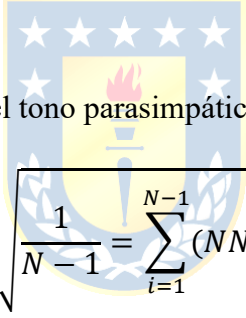
3.6. Extracción de biomarcadores HRV

A partir de los intervalos NN detectados en cada ventana se calcularon métricas HRV en dominios temporal y frecuencial.

3.6.1 Métricas temporales

Se calcularon las siguientes:

RMSSD, un indicador robusto del tono parasimpático:



$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (NN_{i+1} - NN_i)^2}$$

SDNN, que representa la variabilidad total en el intervalo analizado:

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (NN_i - \overline{NN})^2}$$

MeanNN, que corresponde al intervalo promedio entre latidos:

$$MeanNN = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N NN_i$$

3.6.2 Métricas frecuenciales

El espectro de potencia fue estimado mediante el método de Welch, definido como:

$$P(f) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^L |X_k(f)|^2$$

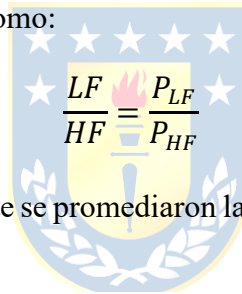
Donde $X_k(f)$ es la transformada de Fourier de la k -ésima ventana.

La potencia en las bandas fisiológicas se obtuvo integrando la densidad espectral:

$$P_{LF} = \int_{0.04}^{0.15} P(f) df$$

$$P_{HF} = \int_{0.15}^{0.40} P(f) df$$

El índice LF/HF fue calculado como:



$$\frac{LF}{HF} = \frac{P_{LF}}{P_{HF}}$$

Finalmente, para cada participante se promediaron las métricas obtenidas en todas sus ventanas válidas

3.7. Emparejamiento con índices psicológicos

Los biomarcadores HRV resultantes fueron integrados con los datos de ansiedad y depresión mediante el código de identificación de cada participante. Los puntajes se consideraron variables continuas y se emplearon directamente como entradas en análisis correlacionales y modelos predictivos.

3.8. Análisis estadístico

Se realizaron análisis descriptivos, correlacionales y multivariados. Para comprobar normalidad de los biomarcadores de HRV y de los índices de ansiedad y depresión se evaluó mediante la prueba Shapiro-Wilk. Usando el supuesto de que si el valor p de la prueba es menor a 0.05 las variables no se consideran con distribución normal justificando el uso de Pearson y Spearman.

La correlación de Pearson se calculó mediante:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

Para evaluar relaciones monótonas se empleó la correlación de Spearman:

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

El análisis multivariado incluyó modelos lineales definidos como:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

Para evaluar la relación entre los biomarcadores HRV y los índices psicológicos de ansiedad y depresión, se calcularon coeficientes de correlación de Pearson y Spearman entre cada métrica HRV (MeanNN, SDNN, RMSSD, HF, LF y LF/HF) y los puntajes de ansiedad y depresión. Dado que se realizaron múltiples pruebas en paralelo, se aplicó una corrección por comparaciones múltiples mediante el método de Falsa Tasa de Descubrimiento (False Discovery Rate, FDR) de Benjamini–Hochberg, considerando significativos aquellos contrastes con $q < 0.05$. (Benjamini & Hochberg, 1995)

Además de los coeficientes y sus valores p, se generaron tablas resumen con los valores ajustados por FDR, junto con gráficos de dispersión y pairplots, con el fin de explorar visualmente la dirección y magnitud de las asociaciones, así como posibles patrones no lineales.

3.9. Software y reproducibilidad

El procesamiento de señales y los análisis estadísticos fueron implementados en Python 3.9. Se utilizaron las bibliotecas:

- **NeuroKit2** para detección de picos y HRV
- **NumPy** y **SciPy** para filtrado y análisis matemático
- **pandas** para manejo de datos
- **scikit-learn** para modelos multivariados
- **Matplotlib** y **Seaborn** para visualización

Capítulo 4. Resultados

4.1. Introducción

Este capítulo presenta los resultados obtenidos a partir del procesamiento de señales PPG, la fase de limpieza y segmentación, la extracción de biomarcadores de HRV y el análisis estadístico aplicado para evaluar su relación con los niveles de ansiedad y depresión en población pediátrica. El estudio se desarrolló en varias etapas: filtrado de señal, detección robusta de artefactos, segmentación en bloques válidos, derivación de métricas HRV, análisis descriptivo, correlacional y multivariado. Los resultados se exponen de manera progresiva, comenzando por la calidad de la señal y finalizando con las conclusiones estadísticas dirigidas al objetivo principal del estudio.

4.2. Calidad de la señal y etapa de limpieza

El análisis inicial de las señales PPG reveló altos niveles de ruido y artefactos en la mayoría de los participantes. En particular, las señales presentaban picos de gran amplitud asociados a movimiento, caídas abruptas relacionadas con saturación del sensor y fluctuaciones irregulares del nivel basal. La Figura 4.1 ilustra un ejemplo representativo donde pueden observarse estos artefactos tanto en la señal cruda como en la filtrada.

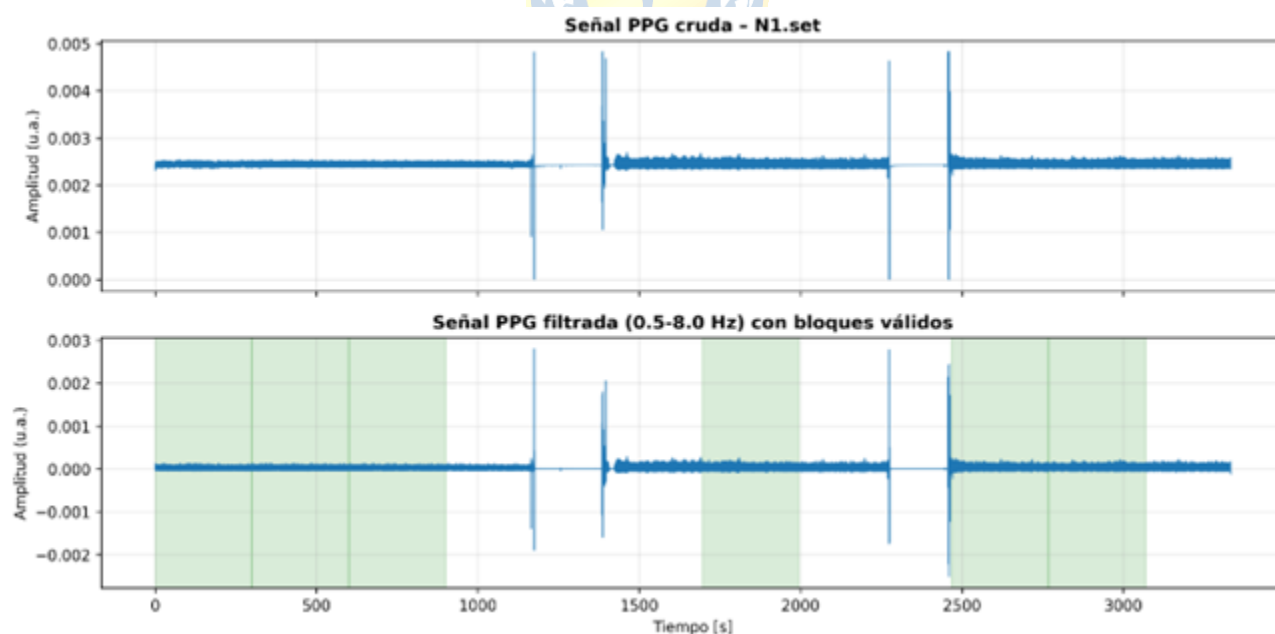


Figura 4.1 Señal PPG original y filtrada con los segmentos válidos destacados en verde.

Las líneas verticales verdes delimitan las ventanas de cinco minutos que cumplen el criterio de calidad (al menos 75 % de intervalos NN válidos) y que fueron utilizadas para el cálculo de los biomarcadores de HRV; los tramos no resaltados corresponden a segmentos descartados por presencia de artefactos.

De la muestra inicial de 97 participantes pertenecientes a la provincia de Concepción la muestra final estuvo compuesta por 62 participantes, tras la aplicación de los criterios de inclusión y la disponibilidad de registros PPG y cuestionarios completos. La Tabla 4.1 resume la distribución demográfica de los sujetos en términos de sexo, edad y estado mental.

Tabla 4.1 Características demográficas y psicológicas de la muestra incluida en el análisis (5–8 bloques válidos).

Variable	Categoría	Valor
Participantes	N total	62
Sexo	Masculino	23
	Femenino	39
Edad (años)	Media $\pm$ desviación estándar	13.5 $\pm$ 1.69
	Rango (mín-máx)	12 - 16
Ansiedad (índice)	Media $\pm$ desviación estándar	12.1 $\pm$ 4.2
	Rango (mín-máx)	6 – 23
Depresión (índice)	Media $\pm$ desviación estándar	11.7 $\pm$ 3.8
	Rango (mín-máx)	6 – 20
Bajo nivel de ansiedad	N total	20
Nivel medio de ansiedad	N total	23
Alto nivel de ansiedad	N total	19
Bajo nivel de depresión	N total	22
Nivel medio de depresión	N total	21
Alto nivel de depresión	N total	19
Hombres con ansiedad	Porcentaje	65.2%
Hombres con depresión	Porcentaje	60.9%
Mujeres con ansiedad	Porcentaje	69.2%
Mujeres con depresión	Porcentaje	66.7%

Antes de analizar la calidad de la señal, se presenta la distribución etaria de la muestra obtenida, ya que la variabilidad autonómica depende del proceso de maduración fisiológica. La Figura 4.2 muestra la distribución por edad de los participantes incluidos en el estudio.

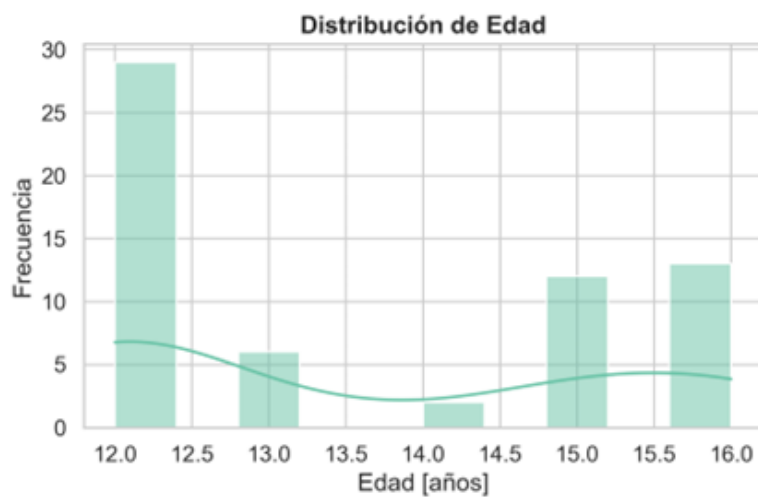


Figura 4.2 Histograma de edades de los pacientes filtrados

Con un total de 97 participantes incluidos en el estudio. Se observa una distribución bimodal, con predominio de participantes de 12 años y un segundo grupo de 15-16 años. Tras el filtrado de bloques validos la muestra queda con tamaño de 62 participantes



Para depurar la señal se aplicó un filtrado pasa banda entre 0.5 y 8 Hz, que permitió recuperar la componente pulsátil principal del pulso cardíaco. Posteriormente se empleó un método robusto para la detección de intervalos NN fisiológicamente coherentes. Este método consistió en identificar el 75% central de la distribución de intervalos RR mediante el rango intercuartílico (IQR), eliminando valores excesivamente pequeños o grandes que correspondían a artefactos. El histograma mostrado en la Figura 4.3 refleja la presencia de múltiples valores atípicos, que fueron excluidos a través de este procedimiento.

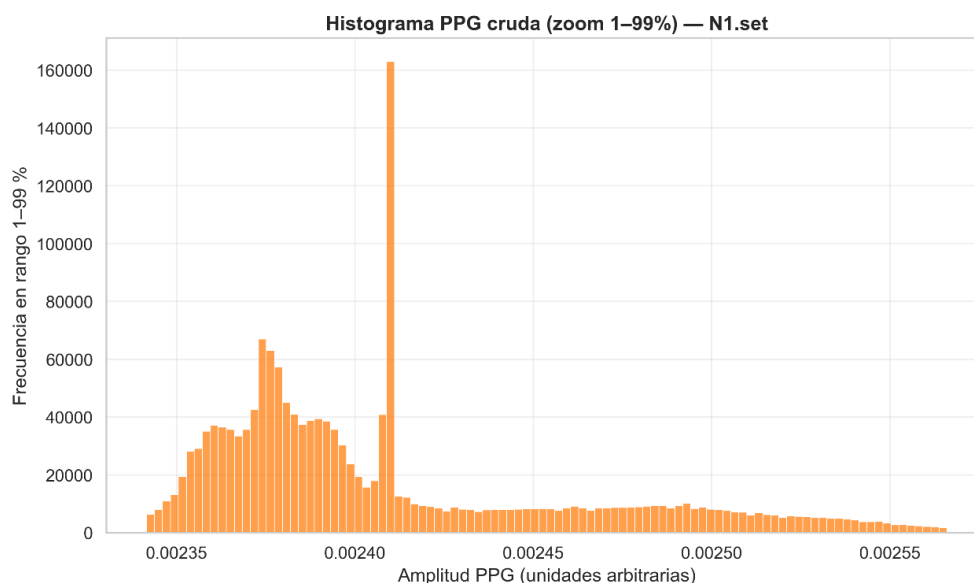


Figura 4.3 Histograma de la señal con acercamiento.

La figura muestra la distribución de los valores entre el percentil 1 y 99 para mejor demostrar que la distribución de los segmentos de ruido se encuentra en los extremos del rango de los valores.

Para asegurar que las mediciones fueran confiables, se estableció que cada ventana de cinco minutos debía conservar al menos el 75 % de intervalos NN válidos. Estos intervalos corresponden a los tiempos entre latidos consecutivos que se mantienen dentro del rango “normal” definido por la distribución del propio sujeto, descartando valores anómalamente cortos o largos asociados a artefactos de movimiento o errores de detección. Las ventanas que no cumplían este criterio fueron eliminadas del análisis, lo que resultó esencial para construir un conjunto de datos limpio y fisiológicamente consistente.

Teniendo que en total se obtuvieron 623 ventanas teóricas de cinco minutos. Tras aplicar el criterio de calidad, se conservaron 424 (68.1%) ventanas, mientras que 199 (31.9%) ventanas fueron descartadas por contener una proporción elevada de artefactos o intervalos no fisiológicos. Este filtrado redujo el volumen de datos, pero permitió trabajar solo con segmentos de señal confiable.

4.3. Segmentación en ventanas de cinco minutos

Una vez procesada cada señal, se efectuó su división en ventanas consecutivas de cinco minutos. Cada ventana fue evaluada en términos de estabilidad, regularidad y proporción de intervalos válidos. Las ventanas aceptadas representaban segmentos de señal suficientemente estables para el cálculo de HRV, mientras que aquellas afectadas por artefactos residuales fueron descartadas. La Figura 4.1 muestra un ejemplo de la segmentación final, donde se observan claramente los segmentos que fueron considerados válidos para el análisis posterior.

Solo se retuvieron participantes que contaban con un mínimo de cinco y un máximo de ocho ventanas válidas dejando un total de 62 participantes como se menciona en tabla 4.1. Esta restricción permitió asegurar comparabilidad entre sujetos y controlar la variabilidad excesiva asociada a registros incompletos.

4.4. Biomarcadores HRV derivados

Los biomarcadores HRV fueron obtenidos a partir de cada ventana válida y posteriormente promediados por participante. Las métricas derivadas incluyeron indicadores temporales como MeanNN, RMSSD y SDNN, así como componentes frecuenciales LF, HF y la razón LF/HF. La matriz de correlación entre los biomarcadores, presentada en la Figura 4.4, mostró patrones fisiológicos esperados, destacándose la relación positiva entre RMSSD y HF, y la relación inversa entre HF y LF/HF. Estas asociaciones confirmaron que el proceso de extracción HRV funcionó de manera adecuada y estuvo alineado con la literatura existente sobre el comportamiento autonómico en reposo. (Malik et al., 1996; Shaffer & Ginsberg, 2017)

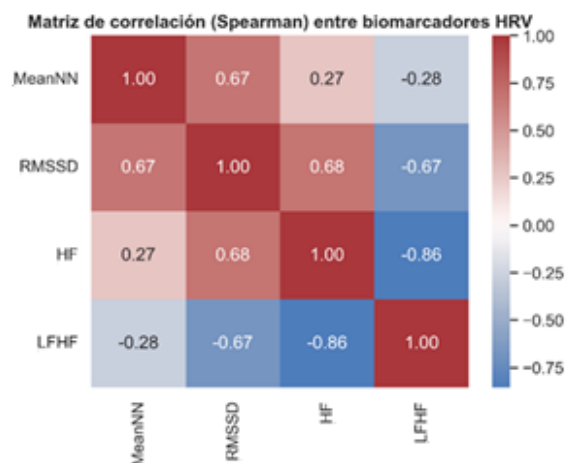


Figura 4.4 Matriz de correlación de Spearman entre los biomarcadores de HRV

Matriz obtenida de los promedios por participante (MeanNN, RMSSD, HF y LF/HF). Los colores representan la magnitud y dirección de los coeficientes de correlación (ρ), donde los tonos rojos indican asociaciones positivas y los tonos azules asociaciones negativas.

4.5. Correlaciones entre HRV y los niveles de ansiedad y depresión

Dado que ninguna de las variables cumplió el supuesto de normalidad como se aprecia en tabla 4.1 según la prueba de Shapiro-Wilk. Las correlaciones de Spearman se interpretaron como análisis principal, y las correlaciones de Pearson se reportaron únicamente como referencia.

Tabla 4.2 Resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk.

Variable	W de Shapiro-Wilk	p
MeanNN	0,950084	0,013470
SDNN	0,911185	0,000273
RMSSD	0,894714	0,000066
LF	0,960658	0,044724
HF	0,960842	0,045685
LF/HF	0,841955	0,000001
Ansiedad	0,933961	0,002425
depresión	0,923370	0,000850

Para evaluar la relación entre la modulación autonómica y los estados emocionales, se calcularon correlaciones de Spearman entre los biomarcadores HRV promediados por participante (MeanNN, SDNN, RMSSD, LF, HF y LF/HF) y los puntajes continuos de ansiedad y depresión. Dado

que se realizaron múltiples contrastes en paralelo, se aplicó una corrección por comparaciones múltiples mediante el método de Falsa Tasa de Descubrimiento (FDR) de Benjamini–Hochberg, considerando significativas aquellas asociaciones con $q < 0,05$.

Tabla 4.3 Correlaciones de Spearman entre biomarcadores HRV y los índices de ansiedad y depresión, con corrección FDR (n = 62).

Correlaciones de Spearman (ρ) entre biomarcadores HRV promediados por participante y los índices continuos de ansiedad y depresión (n = 62). Se muestran los coeficientes ρ , los valores p no ajustados y los valores q tras corrección por FDR. Ninguna de las asociaciones alcanzó significancia estadística ($q < 0,05$).

Biomarcador	ρ	p	q (FDR)	ρ	p	q (FDR)
	Ansiedad	Ansiedad	Ansiedad	Depresión	Depresión	Depresión
RMSSD	0.204	0.112	0.280	-0.064	0.618	0.952
HF	0.207	0.106	0.280	-0.008	0.952	0.952
LF	0.060	0.646	0.646	0.055	0.670	0.952
LF/HF	-0.172	0.182	0.303	-0.028	0.827	0.952
MeanNN	0.113	0.380	0.475	0.096	0.461	0.952

La Tabla 4.3 resume los coeficientes de Spearman (ρ), los valores p crudos y los valores q ajustados por FDR para ansiedad y depresión. En el caso de la ansiedad, las magnitudes de los coeficientes se mantuvieron en rangos bajos ($|\rho| \leq 0,21$), con valores p entre 0,106 y 0,646. Tras la corrección por FDR, ninguno de los contrastes resultó significativo ($q \geq 0,28$). En términos de dirección, se observó una tendencia a que puntajes más altos de ansiedad se asociaran con leves aumentos de RMSSD y HF y con ligeras disminuciones de LF/HF; sin embargo, estas variaciones fueron pequeñas y no permiten concluir la existencia de una relación robusta.

Para la depresión se observó un patrón similar: las correlaciones de Spearman entre los biomarcadores HRV y los puntajes de depresión fueron de baja magnitud ($|\rho| \leq 0,10$), con valores p muy por sobre el umbral de significancia. Luego de aplicar la corrección por FDR, todos los valores q se mantuvieron cercanos a 0,95, lo que indica ausencia de asociaciones estadísticamente significativas entre HRV y los niveles de depresión en las condiciones de reposo evaluadas.

De manera complementaria, se calcularon correlaciones de Pearson (no mostradas en la tabla), las cuales presentaron magnitudes y direcciones similares a las observadas con Spearman, reforzando la conclusión de que no se identifica una relación lineal clara entre los biomarcadores HRV en reposo y los índices de ansiedad y depresión en esta muestra.

4.6. Análisis visual multivariado

Además de los análisis correlacionales, se emplearon representaciones visuales multivariadas mediante pairplots para explorar posibles patrones no lineales o agrupamientos entre los participantes según sus niveles emocionales. Los gráficos, presentados en las Figuras 4.5 y 4.6, muestran una amplia superposición entre los grupos, confirmando que la variabilidad autonómica en reposo presenta un comportamiento altamente heterogéneo en población pediátrica.

Relación entre biomarcadores HRV por grupo de Ansiedad

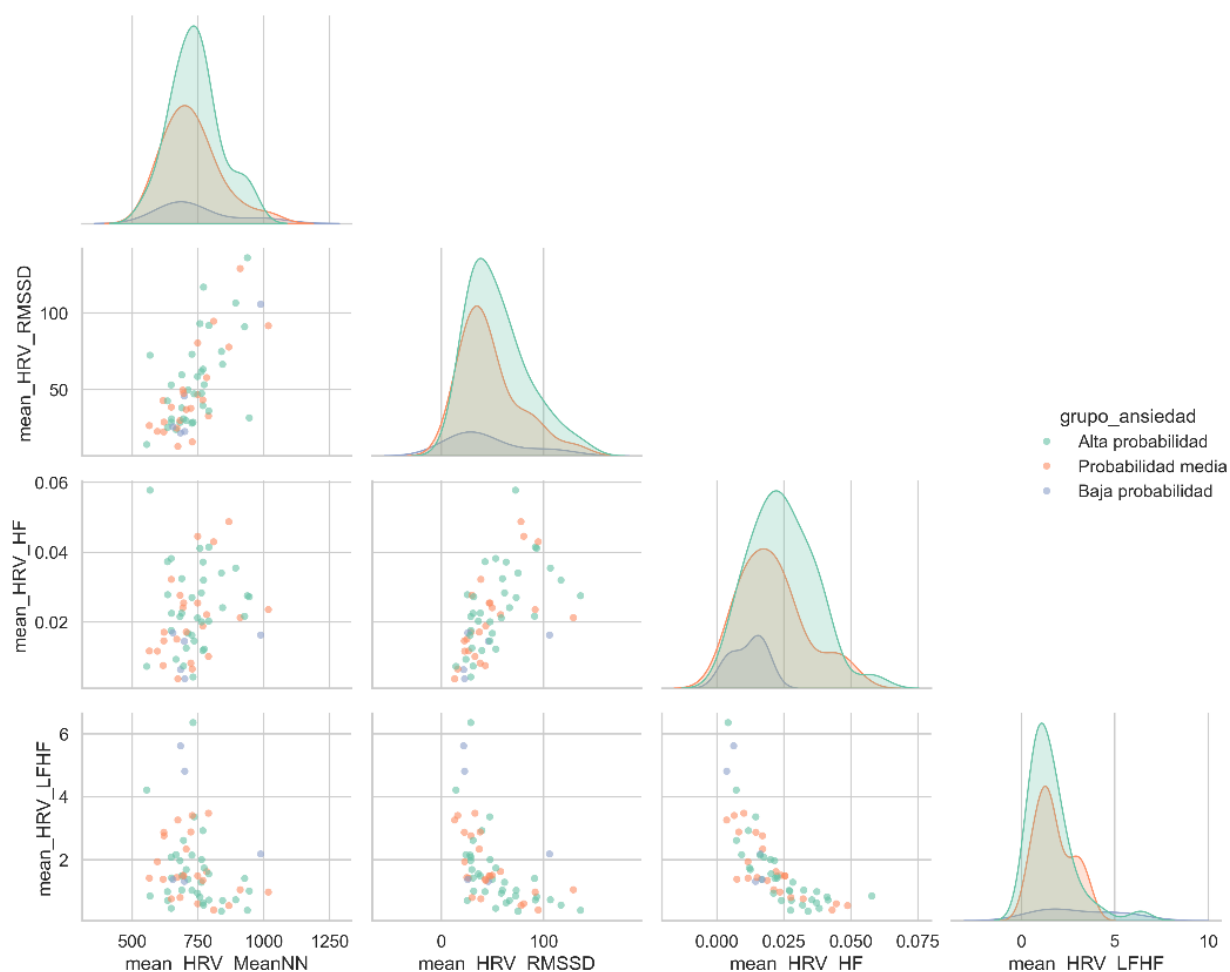


Figura 4.5 Diagrama de pares (pairplot) de los biomarcadores según las categorías de ansiedad.

En la diagonal se muestran las distribuciones estimadas de cada biomarcador para cada categoría, mientras que en los paneles inferiores se representan los gráficos de dispersión para cada par de biomarcadores. Cada punto corresponde a un participante y el color indica su grupo de probabilidad de ansiedad (baja, media o alta).

Relación entre biomarcadores HRV por grupo de Depresión

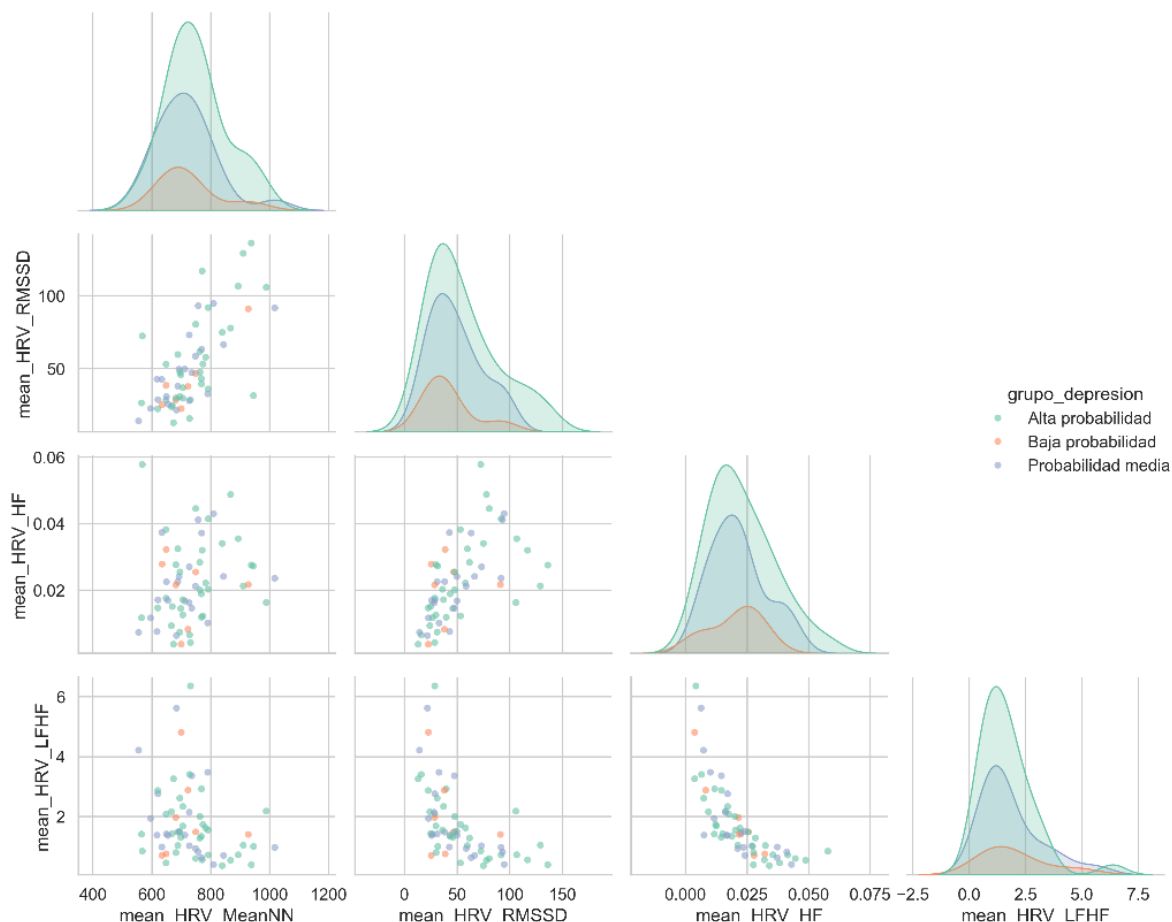


Figura 4.6 Diagrama de pares (pairplot) de los biomarcadores según las categorías de depresión.

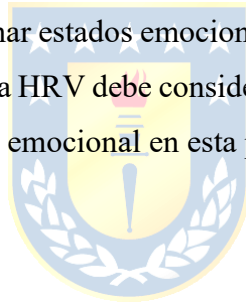
La diagonal muestra las distribuciones estimadas de cada biomarcador para cada grupo, y los paneles inferiores presentan los gráficos de dispersión para cada combinación de biomarcadores. Cada punto representa a un participante y su color corresponde al grupo de probabilidad de depresión (baja, media o alta) definido por el cuestionario.

Esta superposición sugiere que los biomarcadores HRV derivados de señales en reposo poseen una capacidad limitada para discriminar estados emocionales en este tipo de población.

4.7. Síntesis de hallazgos

El proceso de depuración y segmentación permitió obtener señales PPG fisiológicamente confiables pese al ruido considerable presente en los registros originales. Los biomarcadores HRV presentaron valores y relaciones internas coherentes con los patrones autonómicos descritos para población pediátrica en reposo. Por una parte, la matriz de correlación mostró asociaciones positivas entre RMSSD y HF y una relación inversa entre HF y LF/HF, consistentes con una mayor modulación vagal cuando RMSSD y HF son altos. Por otra parte, la comparación con los valores reportados por Silveti (Silveti et al., 2001) para niños y adolescentes sanos (Tabla 5.1) indica que las medias de MeanNN y RMSSD del presente estudio se ubican dentro de rangos similares, lo que respalda la plausibilidad fisiológica de las métricas obtenidas. Sin embargo, los análisis estadísticos realizados no evidenciaron relaciones sólidas entre HRV en reposo y los niveles de ansiedad y depresión.

Los resultados sugieren que, aunque la HRV refleja aspectos importantes del funcionamiento autonómico, su capacidad para discriminar estados emocionales en menores bajo condiciones basales es limitada. Ello refuerza la idea de que la HRV debe considerarse como un indicador complementario y no como un predictor único del estado emocional en esta población. (Malik et al., 1996)



Capítulo 5. Conclusiones

5.1. Discusión

El objetivo de este estudio fue evaluar la relación entre biomarcadores de HRV derivados de señales PPG y los niveles de ansiedad y depresión en una muestra de menores. Este propósito exigió, en primer lugar, enfrentar los desafíos asociados a la calidad de las señales PPG, caracterizadas por artefactos de movimiento, pulsos irregulares y episodios de saturación. El pipeline de procesamiento implementado —basado en filtrado pasabanda, detección robusta de intervalos NN y selección de ventanas con al menos un 75% de intervalos válidos— permitió depurar registros inicialmente muy ruidosos y obtener segmentos fisiológicamente plausibles para el cálculo de HRV.(Elgendi, 2012; Schäfer & Vagedes, 2013)

Los biomarcadores derivados a partir de estos segmentos mostraron valores y relaciones internas coherentes con la fisiología autonómica descrita en población pediátrica. La matriz de correlación entre métricas HRV (Figura 4.4) evidenció asociaciones positivas entre RMSSD y HF, así como entre RMSSD y SD1, y una relación inversa entre HF y el índice LF/HF, patrón consistente con una mayor modulación vagal cuando RMSSD y HF son altos y con un predominio relativo simpático cuando se incrementa LF/HF. Adicionalmente, la comparación con los valores reportados por Silvetti para niños y adolescentes sanos (Tabla 5.1) muestra que las medias de MeanNN y RMSSD del presente estudio se ubican dentro de rangos similares(Massin & von Bernuth, 1997; Silvetti et al., 2001), pese a las diferencias metodológicas entre registros de 24 horas con ECG y ventanas de 5 minutos obtenidas mediante PPG. En conjunto, estos antecedentes respaldan la plausibilidad fisiológica de las métricas HRV obtenidas.

Tabla 5.1 Comparación de biomarcadores de variabilidad de la frecuencia cardiaca (HRV) entre el presente estudio y los valores reportados por Silvetti et al. (2001).

Estudio/grupo	Tipo de registro	Rango etario (años)	n	MeanNN (ms) ± DE	RMSSD (ms) ± DE
Presente estudio (PPG)	PPG, 5 min	12-16	62	753.2±101.5	51.4±29.4
Silvetti 11–15 F (Grupo 3a)	ECG, 24h	11-15	18	751±102	77±30

El análisis de los biomarcadores en función de la edad mostró una influencia marcada del desarrollo sobre la modulación autonómica. En línea con lo descrito en estudios previos, se observó un aumento de MeanNN y una reducción progresiva de RMSSD y HF en los participantes de mayor edad, reflejando el proceso de maduración autonómica propio de la etapa adolescente (Massin & von Bernuth, 1997; Silveti et al., 2001). Esta tendencia sugiere que parte importante de la variabilidad de HRV en la muestra está explicada por factores evolutivos, lo que puede enmascarar diferencias más sutiles asociadas a los estados emocionales.

En relación con el objetivo principal, las correlaciones de Spearman entre los biomarcadores HRV y los índices continuos de ansiedad y depresión (Tabla 4.2) presentaron magnitudes bajas ($|\rho| \leq 0,21$) y no alcanzaron significancia estadística tras la corrección por FDR. Aunque los efectos fueron pequeños, la dirección de los coeficientes resultó compatible con el modelo fisiológico esperado: las variaciones de RMSSD y HF, así como del índice LF/HF, se orientaron en el sentido de una menor modulación vagal y un mayor peso relativo simpático en los participantes con puntajes emocionales más elevados. Sin embargo, la combinación de coeficientes débiles, valores p elevados y valores $q \geq 0,28$ indica que no es posible establecer relaciones sólidas entre HRV en reposo y los niveles de ansiedad o depresión en esta muestra. (Chalmers et al., 2014; Ding et al., 2024; Koenig et al., 2016; Malik et al., 1996; Shaffer & Ginsberg, 2017)

Los análisis visuales multivariados complementaron esta conclusión. Los diagramas de pares (Figuras 4.5 y 4.6) mostraron distribuciones amplias de los biomarcadores dentro de cada grupo de probabilidad de ansiedad y depresión, junto con una superposición marcada entre categorías. No se observaron agrupamientos claramente diferenciados que permitieran separar, a partir de HRV, a los participantes con baja, media o alta probabilidad de sintomatología emocional. Estos resultados sugieren que la variabilidad interindividual en HRV basal es considerablemente mayor que las diferencias atribuibles a los niveles de ansiedad o depresión, lo que limita la capacidad discriminativa de HRV en reposo como marcador aislado de estados emocionales en menores. (Koenig et al., 2016; Sharma et al., 2011; Wang et al., 2025)

El estudio enfrentó limitaciones importantes. La calidad de las señales PPG varió considerablemente entre participantes, lo que obligó a descartar segmentos completos y redujo la cantidad de ventanas disponibles para algunos sujetos. La naturaleza óptica de la PPG la hace susceptible a artefactos por movimiento, variaciones en la perfusión periférica y fluctuaciones del contacto con el sensor, lo que genera irregularidades que no siempre pueden corregirse completamente mediante técnicas de filtrado.

La variabilidad interindividual de los biomarcadores HRV en población pediátrica es particularmente elevada, lo que dificulta la interpretación de diferencias sutiles entre grupos emocionales. Además, este estudio se basó exclusivamente en mediciones en reposo, lo cual restringe la capacidad de detectar modulaciones autonómicas más pronunciadas asociadas a tareas cognitivas o desafíos emocionales.

Finalmente, aunque se consideró la posibilidad de aplicar modelos multivariados más complejos, estos fueron descartados debido a problemas de convergencia y a que no aportarían información adicional decisiva dada la naturaleza de los datos.

En síntesis, el estudio demuestra que es posible obtener biomarcadores HRV fisiológicamente coherentes a partir de señales PPG pediátricas inicialmente ruidosas, utilizando un pipeline de procesamiento robusto y reproducible. No obstante, bajo las condiciones específicas de este trabajo —registro en reposo, muestra con distribución etaria bimodal y rangos de ansiedad y depresión acotados—, la HRV basal no mostró asociaciones estadísticamente significativas con los índices emocionales. Estos hallazgos coinciden con la literatura que señala una evidencia más heterogénea en población pediátrica y refuerzan la idea de que la HRV debe interpretarse como un indicador complementario, integrado a otros parámetros fisiológicos y contextuales, más que como un predictor único del estado emocional.(Elgendi, 2012; Koenig et al., 2016; Malik et al., 1996)

5.2. Conclusiones

El presente estudio tuvo como propósito evaluar la relación entre biomarcadores de HRV, derivados de señales PPG, y los niveles de ansiedad y depresión en una muestra pediátrica. Para ello fue necesario diseñar e implementar un pipeline de procesamiento capaz de enfrentar la alta presencia de artefactos en las señales originales.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el esquema de filtrado, detección robusta de intervalos NN y segmentación por ventanas con al menos un 75% de intervalos válidos fue efectivo para transformar registros PPG inicialmente muy ruidosos en segmentos utilizables para el análisis de HRV, bajo criterios reproducibles y explícitamente documentados.

En segundo lugar, los biomarcadores HRV derivados de estos segmentos mostraron valores y patrones de relación interna congruentes con la fisiología autonómica descrita para población pediátrica en reposo. La matriz de correlación entre métricas HRV evidenció asociaciones coherentes entre indicadores parasimpáticos (RMSSD, HF) y el índice LF/HF, y la comparación con los rangos reportados en estudios previos en niños y adolescentes sugiere que las medias de MeanNN y RMSSD del presente trabajo se sitúan dentro de márgenes fisiológicamente plausibles. Asimismo, se observaron tendencias asociadas a la edad que son compatibles con la maduración autonómica, como el incremento de MeanNN y la disminución de RMSSD y HF en los participantes de mayor edad. Estos elementos permiten afirmar que, pese a las dificultades iniciales de calidad de señal, los biomarcadores obtenidos son representativos de la variabilidad cardíaca esperable en la población estudiada. (Malik et al., 1996; Massin & von Bernuth, 1997; Shaffer & Ginsberg, 2017; Silveti et al., 2001)

Sin embargo, y en relación directa con el objetivo central del estudio, no se identificaron asociaciones estadísticamente significativas entre los biomarcadores HRV en reposo y los niveles de ansiedad o depresión (Chalmers et al., 2014; Koenig et al., 2016). Las correlaciones de Spearman presentaron magnitudes bajas y no se mantuvieron significativas tras la corrección por comparaciones múltiples, y los análisis visuales mediante gráficos de dispersión y diagramas de pares mostraron una amplia superposición entre los grupos de probabilidad de ansiedad y depresión, sin configurarse

patrones claramente diferenciables. En este contexto, la principal conclusión es que la HRV basal, obtenida a partir de señales PPG en condiciones de reposo, presenta una capacidad limitada para discriminar estados emocionales en menores cuando se utiliza como único indicador fisiológico. Más bien, sus resultados apuntan a que la HRV debe ser considerada como una medida complementaria, cuyo mayor potencial se encuentra en su integración con otros marcadores fisiológicos y psicológicos, y posiblemente en el marco de protocolos dinámicos que exploren la respuesta autonómica ante desafíos o cambios de estado, más que en condiciones estrictamente basales.

5.3. Trabajo futuro

Futuros estudios podrían beneficiarse de la implementación de protocolos dinámicos que incluyan tareas de mayor concentración controladas o actividades de reactividad que permitan observar cambios más pronunciados en la modulación autonómica. Asimismo, la utilización de sensores ópticos de mayor fidelidad o la combinación de PPG con otros indicadores fisiológicos — como la conductancia de la piel, la respiración o la variabilidad de la temperatura periférica— podría aumentar la sensibilidad para detectar diferencias emocionales.

También sería valioso trabajar con cohortes más estructuradas por grupo etario para controlar de manera más precisa el efecto del desarrollo sobre la HRV. A pesar de que en el estudio solo un 31.9% de los intervalos no fueron usados, futuros estudios podrían considerar diferentes estrategias para aumentar la cantidad de señal utilizada por paciente. Por último, integrar metodologías de aprendizaje automático solo después de asegurar una señal de calidad suficiente podría permitir explorar patrones no lineales que no son visibles con métodos tradicionales.

Capítulo 6. Glosario

FC : Frecuencia Cardíaca.

HF : High Frequency; componente de alta frecuencia asociada al tono vagal.

HRV : Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (Heart Rate Variability).

IQR : Interquartile Range; rango intercuartílico utilizado para eliminar valores atípicos.

LF : Low Frequency; componente de baja frecuencia asociada a modulación simpática y barorrefleja.

LF/HF : Índice que representa el balance entre actividad simpática y parasimpática.

MeanNN : Promedio de los intervalos NN.

NN : Intervalo Normal-to-Normal entre latidos fisiológicamente válidos.

PPG : Fotopletismografía (Photoplethysmography).

RMSSD : Root Mean Square of Successive Differences; indicador de variabilidad cardiaca de corto plazo.

SDNN : Standard Deviation of NN intervals; desviación estándar total de los intervalos NN.



Capítulo 7. Referencias

- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 57(1), 289–300. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1995.tb02031.x>
- Chalmers, J. A., Quintana, D. S., Abbott, M. J.-A., & Kemp, A. H. (2014). Anxiety Disorders Are Associated with Reduced Heart Rate Variability: A Meta-analysis. *Frontiers in Psychiatry*, 5, 80. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2014.00080>
- Ding, J., Wu, Y., Wang, B., & Sun, Z. (2024). The Relationship Between Depression Severity and Heart Rate Variability in Children and Adolescents: A Meta-analysis. *Journal of Psychosomatic Research*, 173, 111804. <https://doi.org/10.1016/j.jpsychores.2024.111804>
- Elgendi, M. (2012). On the Analysis of Fingertip Photoplethysmogram Signals. *Current Cardiology Reviews*, 8(1), 14–25. <https://doi.org/10.2174/157340312801215782>
- González Mares, M. (2019). Hernández-Sampieri, R. & Mendoza, C (2018). Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. *Revista Universitaria Digital de Ciencias Sociales (RUDICS)*, 10(18), 92–95. <https://doi.org/10.22201/fesc.20072236e.2019.10.18.6>
- Koenig, J., Kemp, A. H., Beauchaine, T. P., Thayer, J. F., & Kaess, M. (2016). Depression and Resting State Heart Rate Variability in Children and Adolescents – A Systematic Review and Meta-analysis. *Clinical Psychology Review*, 46, 136–150. <https://doi.org/10.1016/j.cpr.2016.04.013>
- Malik, M., Camm, A. J., Bigger, J. T., Breithardt, G., Cerutti, S., Cohen, R. J., Coumel, P., Fallen, E. L., Kennedy, H. L., Kleiger, R. E., Lombardi, F., Malliani, A., Moss, A. J., Rottman, J. N., Schmidt, G., Schwartz, P. J., & Singer, D. H. (1996). Heart Rate Variability: Standards of Measurement, Physiological Interpretation, and Clinical Use. *European Heart Journal*, 17(3), 354–381. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.eurheartj.a014868>
- Manterola, C., & Otzen, T. (2014). Estudios Observacionales: Los Diseños Utilizados con Mayor Frecuencia en Investigación Clínica. *International Journal of Morphology*, 32(2), 634–645. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022014000200042>
- Massin, M., & von Bernuth, G. (1997). Normal Ranges of Heart Rate Variability During Infancy and Childhood. *Pediatric Cardiology*, 18(4), 297–302. <https://doi.org/10.1007/s002469900178>
- Racine, N., McArthur, T., Cooke, J. E., Eirich, R., Zhu, J., & Madigan, S. (2021). Global Prevalence of Depressive and Anxiety Symptoms in Children and Adolescents During COVID-19: A Meta-analysis. *JAMA Pediatrics*, 175(11), 1142–1150. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2021.2482>
- Schäfer, A., & Vagedes, J. (2013). How Accurate Is Pulse Rate Variability as an Estimate of Heart Rate Variability? A Review on Studies Comparing Photoplethysmographic Technology with an Electrocardiogram. *International Journal of Cardiology*, 166(1), 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2012.03.119>
- Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*, 5, 258. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>
- Sharma, R. K., Balhara, Y. P. S., Sagar, R., Deepak, K. K., & Mehta, M. (2011). Heart Rate Variability Study of Childhood Anxiety Disorders. *Journal of Cardiovascular Disease Research*, 2(2), 115–122. <https://doi.org/10.4103/0975-3583.83040>
- Silvetti, M. S., Drago, F., & Ragonese, P. (2001). Heart Rate Variability in Healthy Children and Adolescents Is Partially Related to Age and Gender. *International Journal of Cardiology*, 81(2–3), 169–174. [https://doi.org/10.1016/S0167-5273\(01\)00537-X](https://doi.org/10.1016/S0167-5273(01)00537-X)

- Thayer, J. F., Åhs, F., Fredrikson, M., Sollers, J. J., & Wager, T. D. (2012). A Meta-analysis of Heart Rate Variability and Neuroimaging Studies: Implications for Heart Rate Variability as a Marker of Stress and Health. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 36(2), 747–756.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2011.11.009>
- UNICEF. (2021). *The State of the World's Children 2021: On My Mind – Promoting, Protecting and Caring for Children's Mental Health*. UNICEF.
- Wang, Z., Zou, Y., Liu, J., Peng, W., Li, M., & Zou, Z. (2025). Heart Rate Variability in Mental Disorders: An Umbrella Review of Meta-analyses. *Translational Psychiatry*, 15, 104.
<https://doi.org/10.1038/s41398-025-03339-x>
- World Health Organization. (2022). *World Mental Health Report: Transforming Mental Health for All*. World Health Organization.



UNIVERSIDAD DE CONCEPCION – FACULTAD DE INGENIERIA

RESUMEN DE MEMORIA DE TITULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Eléctrica
Carrera : Ingeniería Civil Biomédica
Nombre del memorista : Alejandro Calixto González Vallejos
Título de la memoria : **Correlación entre biomarcadores de variabilidad de la frecuencia cardiaca obtenidos desde PPG y los índices de ansiedad/depresión en población pediátrica**
Fecha de la presentación oral : 22/12/2025

Profesor(es) Guía : Esteban Pino, Mabel Urrutia
Profesor(es) Revisor(es) : Rosa Figueroa, Álvaro Saldaña
Concepto :
Calificación :

Resumen

El estudio tuvo como objetivo evaluar la relación entre biomarcadores de variabilidad de la frecuencia cardíaca (HRV), obtenidos a partir de señales fotopletismográficas (PPG), y los niveles de ansiedad y depresión en población pediátrica. Para ello, se procesaron registros PPG de 45 minutos por participante mediante un pipeline que incluyó filtrado pasabanda, detección de picos y un método robusto basado en el rango intercuartílico (IQR) para descartar intervalos no fisiológicos. Las señales fueron segmentadas en bloques consecutivos de cinco minutos y solo se retuvieron para el análisis aquellos participantes que presentaron entre cinco y ocho ventanas válidas, con al menos un 75% de intervalos NN coherentes en cada segmento.

A partir de cada ventana se calcularon métricas HRV en dominios temporal y frecuencial, incluyendo MeanNN, SDNN, RMSSD, LF, HF y el índice LF/HF. Estos biomarcadores se integraron con los puntajes de ansiedad y depresión obtenidos mediante cuestionarios psicométricos validados. Sobre esta base, se realizaron análisis descriptivos, correlaciones de Spearman con corrección por Falsa Tasa de Descubrimiento (FDR) y exploraciones visuales mediante gráficos de dispersión y diagramas de pares (*pairplots*).

Los resultados mostraron que los biomarcadores HRV derivados de las señales PPG presentaron valores y patrones de correlación interna coherentes con la fisiología autonómica descrita en menores, así como tendencias asociadas a la edad compatibles con la maduración autonómica. Sin embargo, las correlaciones entre HRV en reposo y los niveles de ansiedad y depresión fueron de baja magnitud ($|r| \leq 0,21$) y ninguna asociación alcanzó significancia estadística tras la corrección por FDR. Los análisis visuales evidenciaron una alta variabilidad interindividual y una marcada superposición entre los grupos de probabilidad de ansiedad y depresión, lo que indica una capacidad discriminativa limitada de la HRV basal en esta población.

Se concluye que, aunque la HRV refleja aspectos relevantes del funcionamiento autonómico y puede obtenerse de manera fiable a partir de señales PPG mediante un pipeline reproducible, su uso como indicador aislado de estados emocionales en menores resulta limitado bajo condiciones de reposo. Se propone como línea futura la incorporación de protocolos dinámicos y la integración de la HRV con otros marcadores fisiológicos y psicológicos, con el fin de mejorar la sensibilidad para detectar diferencias emocionales clínicamente significativas.